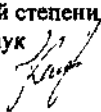


КАЮМОВ Ринат Талгатович

**УЛУЧШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ИНТЕГРАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ УРОВНЯ ЭМП ДЛЯ ЗАДАЧ
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

Специальность: **05.11.13** - Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**



Казань 2002

Диссертация выполнена на кафедре радиоэлектронных и телекоммуникационных систем Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева

Научный руководитель: заслуженный деятель науки и техники РТ, доктор технических наук, профессор, Седельников Ю.Е.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, Баширов З.А.

кандидат технических наук, доцент, Болознев В.В.

Ведущая организация: ФГУП «СКБ РИАП» (г. Н. Новгород)

Защита состоится «13» декабря 2002 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета **D212.079.04** при казанском государственном техническом университете им. А.Н. Туполева в зале заседаний ученого Совета по адресу: **420111**, г. Казань, ул. К. **Маркса**, д. 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева

Автореферат разослан «22» 12/2002 2002 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



В.А. Козлов

Актуальность проблемы:

Несмотря на быстро растущее число источников в настоящее время ни санитарно-эпидемиологические **службы**, ни тем более, экологические не располагают достаточно подробными сведениями, характеризующими картину распределения электромагнитных полей (**ЭМП**) различных частотных диапазонов с различными видами модуляции для подавляющего числа крупных городов России. Таким образом, назрела необходимость в разработке комплекса программных и технических средств, способных обеспечить обследование состояния и обеспечения контроля **уровней** и параметров, ЭМП в условиях крупных и средних городов. При этом **несовершенство нормативной** базы, в том числе вызванное недостаточной изученностью явлений, ни в коей мере не снижает актуальности задачи. Более того, развитие систем электромагнитного мониторинга (ЭММ) будет **способствовать прогрессу** в биологических аспектах проблемы, хотя бы из-за открывающихся возможностей существенного расширения объема наблюдаемых данных.

Экспериментальные исследования составляют неотъемлемую часть в различных областях **науки**, техники и производства. Поэтому эффективность (определяется качеством измерений и затратами, которые потребовались для **его** достижения) экспериментальных исследований имеет существенное практическое и экономическое значение и заслуживает всестороннего анализа.

Известны работы в области контроля энергетических параметров **ЭМП**, что говорит о большом интересе к этой проблеме. Решению задач улучшения метрологических характеристик интегральных измерителей посвящены работы учёных: Рудакова М.Л., **Хилова В.П.**, Артамонова **В.В.**, в которых основной акцент делается на вопросы снижения случайной погрешности и ослабления влияния неравномерности частотных характеристик. В работах многих авторов отмечается, что контроль ЭМП создаваемых большим числом источников излучения является нетривиальной задачей, а использование имеющихся измерителей не позволяет проводить анализ ЭМП совокупности источников излучения.

В научной литературе рассматриваются способы контроля электромагнитных полей совокупности источников излучения, которые сводятся к созданию автоматизированных комплексов, включающих комплект приборов и вычислительного устройства. В комплект комплекса входят интегральные измерители уровня **ЭМП**, т.к. использование селективных **приёмников** радиопомех (ESBM, EB2001, П5-42) в задачах экологического мониторинга экономически нецелесообразно (стоимость таких **приборов** колеблется в пределах 40... 100 тыс. долларов). Использование интегральных

измерителей в силу недостаточной селективности существенно снижают качество измерений уровня ЭМП совокупности источников излучения. Поэтому улучшение метрологических характеристик интегральных измерителей является актуальной задачей. Применение в комплексе методов улучшения метрологических характеристик интегральных измерителей позволяет повысить качество экологического контроля.

Целью работы является повышение информативности и достоверности существующих методов экологического контроля уровней электромагнитного поля (ЭМП) совокупности источников излучения интегральными измерителями.

Основная задача заключается в разработке методов повышения достоверности результатов измерений интегральных приборов, предназначенных для проведения экологического мониторинга. Для достижения основной задачи необходимо:

- провести анализ существующих методов и приборной базы, предназначенных для экологического контроля уровней ЭМП, а также провести оценку **погрешности** интегральных измерителей при проведении экологического контроля уровней ЭМП создаваемых совокупностью источников излучения.

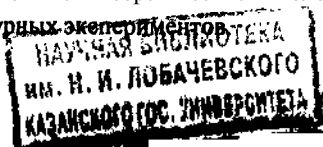
- разработать реконструктивные методы уменьшения погрешности интегральных измерителей и повышение информативности результатов экологического контроля уровней ЭМП создаваемых совокупностью источников излучения.

- провести теоретическую оценку влияния инструментальной **погрешности**, количества источников излучения и их распределения по частоте на результаты измерения уровня ЭМП совокупности источников излучения.

- провести экспериментальную оценку достигаемого эффекта при использовании разработанных методов и их сравнение с теоретическими результатами;

- разработать методики и рекомендаций к проведению экологического контроля уровней ЭМП создаваемых совокупностью источников излучения интегральными измерителями на основе разработанных методов.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использованы методы математического моделирования, элементы теории случайных процессов, методы решения некорректно поставленных задач, а так же методы линейного программирования. Основные теоретические положения и результаты проверены с помощью **натурных экспериментов**.



Научная новизна работы заключается в **следующем**:

1. Для измерения уровней **ЭМП** создаваемого совокупностью источников излучения интегральными измерителями предложен реконструктивный метод. Показано, что его использование позволяет повысить достоверность и информативность результатов экологического мониторинга;

2. Предложены алгоритмы реализации реконструктивного метода для различных **ситуаций** экологического мониторинга позволяют более эффективно определять интегральные уровни **ЭМП** совокупности источников излучения.

3. Для измерений уровня **ЭМП** создаваемого совокупностью источников излучения предложено использование предварительного частотного анализа с последующей обработкой информации. Показана возможность **повышения** достоверности и информативности результатов экологического контроля.

4. Предложены методики проведения экологической экспертизы **ЭМИ** совокупности источников излучения с использованием интегральных измерителей и предложенных методов.

Практическая ценность диссертации: Предложенный и запатентованный метод улучшения метрологических характеристик **интегральных** измерителей позволяет на более качественном уровне проводить экспертизу **ЭМП** создаваемых совокупностью источников излучения в соответствии с существующими стандартами, с помощью имеющихся серийных приборов без существенного изменения, а также без значительных экономических затрат.

Результаты диссертационной работы использованы федеральным государственным унитарным предприятием СКБ РИАП (г. Н. Новгород) в разработке проекта усовершенствования интегральных измерителей, научно-исследовательским центром НИЦ **ПРЭ КГТУ** им. А.Н. Туполева в разработке мобильной системы **электромагнитного** мониторинга; **НГДУ «ЛН»** в разработке проекта инструментального контроля уровней электромагнитных полей на рабочем месте и прилегающей территории.

На защиту выносятся:

1. Реконструктивные методы, позволяющие компенсировать **методическую** погрешность измерения уровня **ЭМП** совокупности источников излучения, обусловленную недостаточной селективностью **интегрального** измерителя.

2. Алгоритмы обработки результатов измерений для различных ситуаций экологического **мониторинга**, повышающие эффективность реконструктивного метода экологического контроля уровней **ЭМП** совокупности источников излучения, что доказано теоретическими и экспериментальными исследованиями.

3. Методика, **основанная** на использовании предварительного частотного анализа **при отсутствии** информации о количестве источников **излучения** и их

частотном **распределении**, **существенно** повышающая **достоверность** экологического мониторинга.

4. Разработанные методики для выбора последовательности операций на каждом этапе определения уровней **ЭМП** совокупности источников **излучения**, позволяющие упростить проведение экологического мониторинга.

Личный вклад автора в проведённое исследование заключается в том, что автор, проделав аналитический обзор литературы, выполнил постановку и решение поставленных в диссертации задач, провёл моделирование измерений напряжённости электрического поля, экспериментальное исследование эффективности методов улучшения **метеорологических** характеристик интегральных измерителей с соответствующими выводами.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на шестой международной научно-технической конференции студентов и **аспирантов** «Радиоэлектроника, электроника и энергетика» (Москва, **2000г.**), десятой международной крымской микроволновой конференция «**СВЧ-** техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, **2000г.**), всероссийской научной конференции «Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии городов» (Пенза, **2001г.**), на IV научно практической конференции молодых учёных и специалистов республики Татарстан «Радиотехнические устройства и системы» (**Казань**, 2001 г.), на VII Российской научно-технической конференции «Электромагнитной совместимости (**ЭМС-2002**)» (Санкт-Петербург, 2002 г.). По результатам, представленным на конкурс получены: диплом Министерства образования Российской Федерации в разделе «Авиация, авиастроение и воздушный транспорт» (приказ №315 от **31.01.2001г.**); диплом третьей степени на республиканском конкурсе научных работ среди студентов и аспирантов на соискание премии им. Н.И. **Лобачевского**, диплом на республиканском конкурсе «Лучшее изобретение года».

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 5 статьях, 7 тезисах, включая 1 патент РФ.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа изложена на 143 страницах машинописного текста, содержит 35 рисунков и 7 таблиц, состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из **113** наименований и 5 приложений на 29 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, **перечислены** положения, вносимые на защиту, приведена структура диссертации.

В первой главе проведён аналитический обзор литературы, посвящённой проблемам электромагнитного мониторинга, специфике приборной базы для измерений, а также особенностям распространения электромагнитных волн. Раскрыты вопросы нормирования предельно-допустимых уровней (ПДУ) ЭМП совокупности источников, а так же недостатки существующей экологической экспертизы ЭМП совокупности источников излучения.

Во второй главе проведено имитационное моделирование измерений интегральными измерителями уровня ЭМП, частотные характеристики которых представлены характеристиками низкодобротных одноконтурных фильтров. Математическое моделирование проведено с использованием программного пакета MathCad 8.0. При моделировании измерений напряжённости электрического поля варьировались по случайному закону, в заданном диапазоне, погрешности определения коэффициентов преобразования, обусловленные психофизическими факторами, что позволило оценить точность проводимых измерений энергетических параметров ЭМП, с учетом возможных ошибок оператора.

Проведён анализ относительной погрешности, обусловленной недостаточной селективностью используемых преобразователей к излучениям вне «рабочего» диапазона частот на базе предложенной математической модели, который показал, что погрешность обусловленная излучениями вне рабочего диапазона частот преобразователя (помехами), может достигать **60 %...70 %**, если интенсивность **излучений** помех значительно превысит интенсивность исследуемого источника.

Предложена процедура определения уровней ЭМП совокупности источников излучения реконструктивным методом, который заключается: в проведении измерения путем последовательного помещения в измеряемое ЭМП K преобразователей; регистрации напряжений $U_1...U_K$ на элементе нагрузки преобразователей, характеризующих энергетические параметры исследуемого ЭМП, при этом все K преобразователей имеют отличные друг от друга амплитудно-частотные характеристики (АЧХ); определении напряженности электрического поля составляющих ЭМП $E_1...E_N$, из решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

[illegible]

где E_N – напряженность электрического поля на частоте излучения N -го источника (f_N); $K_K f_N$ – коэффициент преобразования, характеризующий АЧХ K -го преобразователя на частоте излучения f_N ; f_N – частота излучения N -го источника; U_K – напряжение на элементе нагрузки K -го преобразователя; $E_{\text{кзм}}$ – напряженность электрического поля измеренная в штатном режиме при использовании K -го преобразователя. Выражение (1) эквивалентно равенству представленному в матричной форме:

$$[A] \cdot [X] = [Y] \quad (2)$$

где $[Y]$ – вектор измеренных значений с элементами $y_i = E_{i,изм}^2$; $[A]$ – $(K \times N)$ матрица поправочных коэффициентов $a_{ij} = K^2_i(f_j)/K^2_i(f[X]$ – искомый вектор с элементами $x_i = E_{i,иск}^2$.

Коэффициенты $K_j(f)$ определяются заранее путем калибровки преобразователей. Таким образом, в результате решения системы линейных уравнений (1) с N неизвестными определяются неизвестные величины квадратов напряженности электрического поля E_1, \dots, E_N .

Показаны недостатки реконструктивного метода при появлении в рабочем диапазоне частот преобразователя двух и более источников, частоты излучения которых, расположены в непосредственной близости друг от друга (по оси частот), а также когда АЧХ преобразователей линейно зависимы. Это приводит снижению устойчивости решения системы (1) к ошибкам, связанным с неточным определением коэффициентов преобразования ($K_K(f_N)$) и результатов измерений ($E_{Kизм}$), или сводит СЛАУ (1) к несовместной системе. Выявлены условия, при которых решение СЛАУ сохраняет устойчивость к возмущениям входных параметров.

Проведена оценка СЛАУ на устойчивость к возмущениям входных данных (коэффициентов матрицы $[A]$ и вектора $[Y]$), которая показала, что при числе обусловленности ≤ 10 наблюдается адекватное изменение погрешности восстановления к изменению входных данных СЛАУ.

$$\xi = \|A^{-1}\| \cdot \|A\| \quad (3)$$

где $\|A\|$ – норма матрицы $[A]$.

Разработана методика определения условия, выполнение которого позволяет получить корректную (по Адамару и Тихонову) СЛАУ применительно к конкретному интегральному измерителю. Методика заключается в проведении анализа погрешности восстановления энергетических параметров ЭМП реконструктивным методом на имитационной модели при заданных допустимых погрешностях оператора. При этом **изменение** числа обусловленности матрицы $[A]$ осуществляется подбором коэффициентов преобразования $K_j(\eta)$.

Проведённый анализ погрешности измерения напряжённости электрического поля реконструктивным методом при возбуждении ЭМП тремя и пятью источниками излучения при различных возмущениях элементов матрицы $[A]$ показал, что увеличение в 2 раза ошибки определения коэффициентов преобразования вызывает повышение погрешности измерения ≈ 2 раза при устойчивых СЛАУ ($\xi = 3,5; 7$), независимо от числа источников излучения, а увеличение числа источников излучения от 3 до 5 – незначительное (1 %...3 %) изменение относительной погрешности результатов восстановления.

Рассмотрена процедура определения энергетических параметров ЭМП совокупности источников излучения для **случая**, когда число измерений превышает количество источников излучения методом решения переопределённой СЛАУ (причём ранг матрицы $[A]$ превышает число источников излучения), в котором в качестве искомого решения принимается вектор выходных параметров $[X^0]$, соответствующий наилучшему решению системы (2) $[X]$, который даёт минимальную невязку $[U]$ (т.е. вектор $[X]$ имеет наименьшую «длину» $\|X^0\| \rightarrow \min$).

$$[U] = [Y] - [A] \cdot [X]. \quad (4)$$

При этом определение энергетических параметров ЭМП сводится к приведению переопределённой СЛАУ к нормальному виду,

$$[A]^T [A] [X] = [A]^T [Y], \quad (5)$$

где $[A]^T$ – транспонированная матрица $[A]$, и нахождению нормального решения, которое характеризует искомые параметры ЭМП.

В случае совпадения количества источников с рангом матрицы $[A]$ СЛАУ (2) решается по классическому методу, а её решение, характеризует энергетические параметры электромагнитного поля действующих источников излучения.

Проведена оценка погрешности восстановления напряжённости электрического поля реконструктивным методом, посредством приведения переопределённых СЛАУ к нормальному виду, подтверждающая работоспособность метода при $K > N$.

Рассмотрены процедуры проведения экологической экспертизы интегрального уровня ЭМП совокупности источников излучения в пределах частотного диапазона используемого преобразователя, для случая, когда число источников излучения превышает число измерений. Одна из процедур сводится к определению **верхней** и нижней границ, в пределах которого находится значение интегрального (в пределах частотного диапазона преобразователя) уровня ЭМП с использованием методов линейного программирования. Физический смысл этой операции заключается в нахождении решения СЛАУ, дающего минимум и максимум формы F . В качестве формы F задается интегральный уровень ЭМП, возбуждаемого действующими источниками излучения,

$$F = \sum_j c_j x_j, \quad (6)$$

где c_j – коэффициенты определяются ПДУ, регламентируемыми СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96; x_j – решение системы линейных уравнений вида.

$$[A] \cdot [X] = [Y], \quad (7)$$

где $[Y]$ – вектор измеренных значений с элементами $y_i = E_{изм}^2$; $[A]$ – $(K \times N)$ матрица поправочных коэффициентов $a_{i,j} = K^2(f_j)/K^2(f_i)$; $[X]$ – искомый вектор с элементами $x_i = E_i^2$, минимизирующее (максимизирующее) заданную форму F .

Из решения СЛАУ (7) минимизирующего форму F (6) вычисляется нижняя граница интегрального уровня в пределах соответствующего диапазона частот из соотношения:

$$E_{\Sigma j} = \sqrt{\sum_{i=1}^k x_i}, \quad (8)$$

где $E_{\Sigma j}$ – интегральная оценка напряжённости электрического поля в пределах частотного диапазона **j-го** преобразователя, k – число источников излучения, рабочие частоты которых соответствуют частотному диапазону **j-го** преобразователя, а из решения максимизирующего форму F (6) определяется верхняя граница интегральной оценки.

Вторая процедура сводится к определению только нижней границы интегрального уровня ЭМП совокупности источников (для решения определённого круга задач), которое сводится к нахождению наилучшего решения системы (при $K < N$) с использованием псевдообратной матрицы,

$$[A]^+ = [C]^T ([C] \cdot [C]^T)^{-1} ([B]^T [B])^{-1} [B]^T, \quad (9)$$

где $([C][C]^T)^{-1}$, $([B]^T[B])^{-1}$ – обратная матриц $([C][C]^T)$ и $([B]^T[B])$; $[C]^T$, $[B]^T$ – транспонированные матрицы $[C]$ и $[B]$, которые определяются методом скелетного разложения матрицы $[A]$,

$$[A] = [B] \cdot [C], \quad (10)$$

где $[A]$ – Ахи матрица ранга r ; $[B]$ – *far* матрица; $[C]$ – *rxn* матрица.

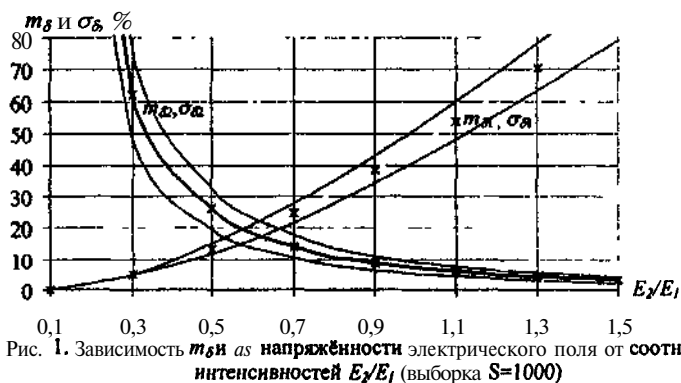
Нижняя граница интегральной напряжённости электрического поля в рабочем диапазоне j -го преобразователя определяется подстановкой решения СЛАУ, полученного методом псевдообратной матрицы в выражение (8).

Проведённый анализ показал возможность определения интегрального уровня ЭМП в пределах частотного диапазона измерителя для случая $K < N$ (в рабочем диапазоне частот измерителя излучают несколько источников излучения), при этом фиксировалось снижение относительной погрешности измерения в 2...3 раза.

Рассмотрены вопросы приведения неустойчивых и вырожденных СЛАУ к регулярному виду по методу А.Н. Тихонова. Для выбора параметра регуляризации предлагается использовать рекомендации Р.Ch. Hansen, которые сводятся к проведению двух независимых измерений одним и тем же преобразователем, при этом одно из измерений используется как истинное.

Третья глава посвящена экспериментальной оценке реконструктивного метода улучшения метрологических характеристик интегральных измерителей напряжённости и плотности потока мощности ЭМП на примере серийного прибора ПОЛЕ-3.

Описана методика определения частотных характеристик преобразователей АП-Е-1 и АП-ППЭ-1А, входящих в комплект прибора ПОЛЕ-3 в лабораторных условиях. Проведено имитационное моделирование измерений напряжённости электрического поля, возбуждаемого двумя источниками излучения метрового и дециметрового диапазона частот прибором ПОЛЕ-3, которое позволило оценить эффективность предложенного метода. На графиках показаны зависимости среднего значения и среднеквадратического отклонения относительной погрешности измерения без использования (рис.1), и с использованием реконструктивного метода (рис. 2, 3).



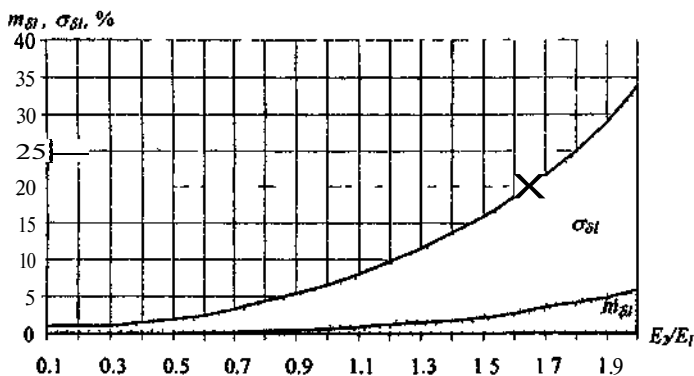


Рис 2. Зависимость $m_{\delta 1}$ и $\sigma_{\delta 1}$ от источника метрового диапазона от соотношения E_2/E_1 (выборка $S=1000$)

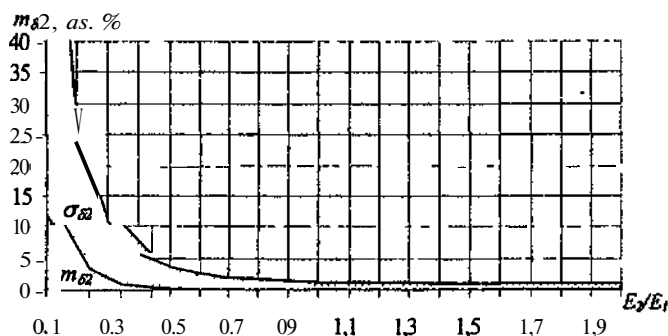


Рис 3. Зависимость $m_{\delta 2}$ и $\sigma_{\delta 2}$ источника дециметрового диапазона от соотношения E_2/E_1 (выборка $S=1000$)

Результаты оценки иллюстрируют целесообразность использования реконструктивного метода, когда отношение напряжённости электрического поля дециметрового диапазона частот к напряжённости электрического поля метрового диапазона лежит в пределах 0,25... 1,65.

Проведены экспериментальные исследования в лабораторных условиях, с целью выявления достигаемого эффекта реконструктивного метода при использовании серийных интегральных измерителей. При этом использовались два генератора Г4-18А и Г4-8, которые поочерёдно возбуждали ЭМП, с частотами излучений, соответствующими метровому и дециметровому диапазонам. Энергетические параметры ЭМП измерялись в штатном режиме (измеренные значения E_1 и E_2 использовались как известные величины, соответствующие истинным значениям), при одновременной работе обоих генераторов с использованием преобразователей АП-Е-1 и АП-ППЭ-1А. По результатам измерений вычисляли относительную погрешность (таблица).

Результаты экспериментальных исследований ЭМП, формируемого двумя источниками излучения метрового и дециметрового диапазона

Параметры	E_2/E_1	E_1 , В/м	E_2 , В/м	$E_{1\text{нзм}}$ В/м	$E_{2\text{нзм}}$ В/м	δE_1 , %	$E_{1\text{вос}}$, В/м	$\delta E_{1\text{вос}}$, %
$f_1 = 50$ МГц	1.32	12.8	16.9	22.33	17.1	74	16.32	28
$f_2 = 478$ МГц	1.09	9.1	10	14.9	10.18	63	12	20
$K_1(f_1) = 0$ дБ	1.07	4.56	4.9	7.3	5.1	60	5.7	26
$K_1(f_2) = 0.75$ дБ	0.95	9.1	8.67	13.4	8.87	47	11	22
$K_2(f_1) = 17.5$ дБ	0.75	9.1	6.5	12.4	6.9	36	10.36	13.8
$K_2(f_2) = 6.5$ дБ	0.67	9.1	6.13	11.7	6.5	28	10.4	14
	0.56	9.1	5	11.06	5.4	21	10.2	12
	0.44	12.7	5.6	15.27	6.28	20	14.3	12

Частота излучения генератора метрового диапазона f_1 принималась равной: 50, 78, 162, 200 МГц, а частота f_2 - 478, 700, 800, 900 МГц соответственно. Структурная схема лабораторной установки для проведения экспериментальных исследований изображена на рис.4.

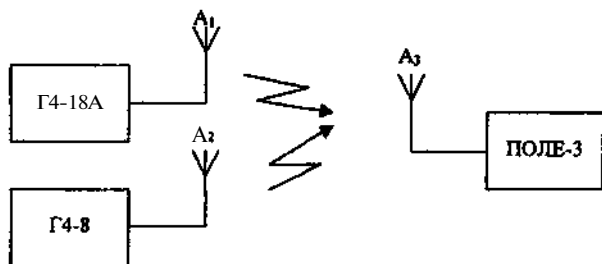


Рис.4. Структурная схема лабораторной установки

Проведённые натурные эксперименты с использованием серийного измерителя показывают снижение погрешности измерения в 2...3 раза.

В четвёртой главе предложены методы, позволяющие повысить достоверность и информативность результатов измерения интегральных уровней ЭМП совокупности источников излучения для случаев:

1. Отсутствие априорной информации о числе источников и их частотах излучения.
2. Отсутствия возможности использования реконструктивных методов или их недостаточной эффективности (результаты реконструктивного метода неприемлемы в силу недостаточной информативности или достоверности).

При отсутствии априорной информации предлагается проведение спектрального анализа сигнала, снимаемого с нагрузки преобразователя (при использовании болометрических или **терморезистивных** и т.п. преобразователей рекомендуется использование ненаправленной антенны с калиброванными характеристиками) с использованием панорамного приёмника типа **AR-3000** с анализатором спектра.

При отсутствии возможности использования реконструктивных методов из-за наличия только одного измерительного преобразователя, недостаточной достоверности (в силу высокой интенсивности источников излучения вне рабочего диапазона частот) или недостаточной информативности (при отсутствии возможности определения вклада каждого из действующих источников излучения в суммарное ЭМП) предлагается помимо определения частоты излучения источников, определять нормированные амплитуды составляющих спектра **сигнала**, снимаемого с нагрузки измерительного преобразователя. Для этих целей предлагается использование сертифицированного ступенчатого или плавного аттенюатора на входе панорамного приёмника. При этом панорамный приёмник с анализатором спектра используется в качестве индикатора наличия или отсутствия сигнала на данной частоте (по превышению порога чувствительности **приёмника**, которая указана в паспорте). Значения нормированных амплитуд определяются по показаниям сертифицированного аттенюатора. Энергетические параметры ЭМП определяются по результатам показаний интегрального измерителя (U_{Σ}) и аттенюатора (\bar{U}_i), посредством проведения математической обработки, которая сводится к решению уравнения,

$$E_i = \frac{\bar{U}_i}{K(f_i)} \frac{U_{\Sigma}}{\sqrt{1 + \sum_{i=1}^N \bar{U}_i^2}}, \quad (11)$$

где U_{Σ} – напряжение индуцируемое источниками излучения в нагрузке преобразователя; E , E_1, \dots, E_N – напряжённость электрического поля, создаваемое источниками излучения; $K(f_1), K(f_2), \dots, K(f_N)$ – коэффициенты преобразования на соответствующей частоте; $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \dots, \bar{U}_N$ – нормированные к максимальному значению амплитуды спектральных составляющих.

Проведённый анализ погрешности измерения, обусловленной неравномерностью частотных характеристик, на примере серийного измерителя **ПОЛЕ-3** с преобразователем **АП-ППЭ-1А** показал, что при отсутствии информации о частоте излучения источника относительная погрешность измерения может достигать **65 %**, даже при измерении уровня ЭМП возбуждаемого одним источником излучения. При измерении средней плотности потока мощности ЭМП возбуждаемого двумя источниками с частотой излучения $f_1=915$ МГц ($K(f_1)=0,7244$) и $f_2=2,45$ ГГц ($K(f_2)=0,7$), даже

при относительно благоприятном случае ($\Delta K(f)=0,0244$) описанный метод позволяет снизить погрешность измерения (который не превышает 6%) в среднем в 2 раза, когда относительная погрешность определения нормированной амплитуды спектральных составляющих равна 20 %. Причем, когда относительная погрешность определения нормированных амплитуд составляет 50 %, относительная погрешность результатов восстановления не превысит 2,5 % (при 20 % - не более 1 %).

Проведённый сравнительный анализ разработанных методов (реконструктивного метода и метода частотного анализа) с использованием имитационного моделирования измерителя ПОЛЕ-3 показал высокую эффективность использования метода частотного анализа (рис. 5) и возможность определения энергетических параметров ЭМП, создаваемой каждым из источников, при наличии источников излучения вне частотного рабочего диапазона преобразователя.

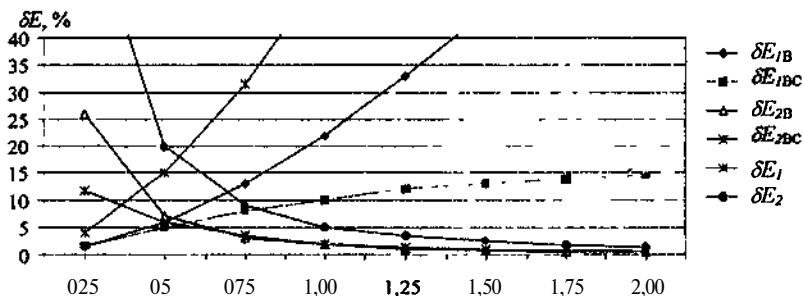


Рис 5 Погрешность измерения напряжённости электрического поля относительно измеряемому знаменанию

При проведении сравнительного анализа предполагалось: имеется два источника излучения, настроенных на частоту 50 МГц и 478 МГц (соответствуют метровому и дециметровому диапазону) ПДУ в которых согласно СанПиН 2.2.4./2.1.8.055-96 различен; коэффициенты преобразования $K_1(f_1)$, $K_2(f_2)$, калиброванные на заводе изготовителе известны точно ($\delta_{11}=\delta_{22}=0$), а коэффициенты $K_1(f_2)$, $K_2(f_1)$ известны с относительной погрешностью $\delta_{12}=0,21$, $\delta_{21}=0,178$; погрешность измерения соотношения амплитуд равна 20 %.

В приложении 1 разработаны рекомендации к проведению измерения энергетических параметров ЭМП совокупности источников излучения. Приведены алгоритмы проведения измерений.

В приложении 2 рассматриваются вопросы регистрации средней мощности выделяемой микроволновой технологической установкой обработки **водонефтяных** эмульсий с использованием ультразвуковых методов. Суть измерений согласно колориметрическим ваттметрам заключается в регистрации

средней по сечению температуры на входе и выходе **резонатора**, отличающееся тем, что для измерения температуры используются ультразвуковые методы. Выделяемая мощность находится из выражения

$$P = \frac{Cm\Delta t^0}{t} \quad (12)$$

где C - **удельная** теплоёмкость; m - масса; Δt^0 - изменение температуры обрабатываемой жидкости, **определяемое** посредством измерения затухания ультразвука или скорости распространения; t - врем облучения жидкости.

В приложении 3 **приведён** протокол испытаний.

В **приложении 4** приведена программа на языке АЛГОЛ для решения недоопределённых СЛАУ.

В приложении 5 проведён анализ влияния погрешности определения нормированных амплитуд спектральных составляющих **сигнала**, снимаемого с нагрузки измерительного преобразователя на результаты восстановления плотности потока мощности. Показано, что при погрешности определения нормированных амплитуд составляющих спектра 40% относительная погрешность восстановления не превысит 2% (без учета погрешности, обусловленной психофизическими факторами), при этом зависимость от соотношения **интенсивностей** действующих источников незначительна.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показана актуальность улучшения существующих методов экологического контроля уровней ЭМП совокупности источников излучения.

2. Разработаны методы, позволяющие повысить достоверность и информативность результатов измерений **интегральными** приборами в задачах экологического **мониторинга** уровня ЭМП совокупности источников излучения, и предложены различные алгоритмы их **использования**:

-число источников излучения соответствует числу рабочих диапазонов частот ($N=K$) - предложено использование классических методов решения СЛАУ, которые позволили повысить точность измерения уровня ЭМП совокупное™ **источников** излучения в среднем в 7 раз (по результатам имитационного моделирования), при экспериментальном исследовании достигалось снижение погрешности в среднем 2...3 раза, а также повысить информативность (позволил **определить** уровень ЭМП возбуждаемого каждым источником излучения в отдельности);

-число источников излучения превышает число рабочих диапазонов частот ($N>K$)- предложено использование метода линейного программирования, который позволил определить диапазон возможного нахождения интегрального уровня ЭМП совокупности источников излучения (верхнюю и нижнюю **границу**

интегрального уровня). При этом наблюдалось снижение погрешности измерения в среднем на **40 %** (когда в **качестве** интегрального уровня ЭМП **принимали** среднее значение между верхней и нижней границей);

-число рабочих диапазонов частот превышает число источников излучения ($N < K$)— предложено использование метода приведения переопределённой СЛАУ к нормальному виду, что позволило повысить точность измерения уровня ЭМП возбуждаемого в точке измерения каждым из источников излучения на **10 % ... 15 %**.

3. Исследовано влияние числа источников излучения, инструментальной погрешности, а также частотных характеристик интегрального измерителя на результаты измерений уровней ЭМП совокупности источников **излучения**. Определены условия получения устойчивого восстановления уровней ЭМП действующих источников излучения по результатам измерений интегральным измерителем. Показана целесообразность использования методов регуляризации **в** задачах **восстановления** уровней ЭМП совокупности источников излучения. Показано, что использование разработанного метода позволяет снизить погрешность измерения напряженности **электрического** поля создаваемого совокупностью источников излучения в **2...3** раза.

4. Предложено использование предварительного частотного анализа исследуемых источников излучения с последующим проведением •дополнительной математической обработки для повышения достоверности и информативности результатов измерений интегрального уровня ЭМП совокупности источников излучения интегральными измерителями.

5. Показано, что использование предварительного частотного анализа позволяет снизить погрешность измерения в **5** раз, а использование реконструктивного метода для **того** же случая (при погрешности определения коэффициентов преобразования $\delta_{12}=0,21$ и $\delta_{21}=0,178$), - уменьшить относительную погрешность в **2** раза.

ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

1. К вопросу повышения точности широкополосных интегральных измерителей напряжённости поля /Седельников Ю.Е., **Каюмов Р.Т.**; **Казан.** гос. техн. ун-т- **Казань**, 2000. – **13 с.**: 5 назв. - Деп. в ВИНТИ 19.01.00. № 90 - ВОО.

2. Патент **2164028** РФ МКИ G01 R 21/08. Способ измерения **напряжённости** электромагнитного поля/ Ю.Е. Седельников, Р.Т. **Каюмов.**- № **99111937/09** (012304); Заяв. **01.06.99**; Опубл. **01.03.2000**; Приоритет **01.06.99**.

3. Каюмов Р.Т., Седельников Ю.Е. Повышение точности интегральных измерений **электромагнитного** поля // Шестая международная научно-техническая конференция студентов и **аспирантов** "Радиоэлектроника, электроника и **энергетика**".– М, 2000– С. **89 – 90**.

4. Повышение точности измерения напряжённости электромагнитного поля совокупности источников интегральными измерителями мощности // Седелников Ю.Е., Каюмов Р.Т.; Казан. гос. техн. ун-т.– Казань, 2000.– 12 с.: 5 назв.– Деп. в ВИНТИ 28.06.00, № 2321 - ВОО.

5. Каюмов Р.Т., Седелников Ю.Е. Методы повышения точности измерений электромагнитного поля совокупности источников // 10-я Международная Крымская микроволновая конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМико'2000). Материалы конференции. Севастополь, Крым, Украина, 11 – 15 сентября 2000. - С. 495 - 496.

6. Каюмов Р.Т. Методы оценки сложных электромагнитных полей интегральными измерителями // Материалы III Всероссийской научной конференции «Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии городов- Пенза, 2001.– С. 66 – 68.

7. Каюмов Р.Т. Методы контроля электромагнитного поля совокупности источников излучения // Республиканский конкурс научных работ среди студентов и аспирантов на соискание премии им. Н.И. Лобачевского. Тезисы итоговой конференции Т.1.– Казань: Изд. КГУ, 2002.– С. 175-176.

8. Каюмов Р.Т. Оценка точности метода измерения напряжённости электромагнитного поля // IV Республиканская научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов. Тезисы докладов. Техническое направление.– Казань: «Мастер Лайн», 2002.– С. 27.

9. Каюмов Р.Т., Гараев Т.К. Исследование электромагнитного поля в нефти // IV Республиканская научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов. Тезисы докладов. Техническое направление.– Казань: «Мастер Лайн», 2002.– С. 28.

10. Каюмов Р.Т., Морозов Г.А., Лаврушев В.Н., Седелников Ю.Е. Системы электромагнитного мониторинга: проблемы и пути их решения // Сб. докладов седьмой научно-технической конференции по электромагнитной совместимости (ЭМС-2002).– СПб.: 2002.– С. 474 – 478.

11. Каюмов Р.Т., Морозов Г.А., Седелников Ю.Е. Контроль ЭМП совокупности источников интегральными измерителями типа ПОЛЕ-3 // Известия вузов. Проблемы энергетики.– Казань, 2002.– № 9-10.– С. 103 – 109.

12. Математическое моделирование измерителя энергетических параметров электромагнитного поля/ Каюмов Р.Т.; Казан. гос. техн. ун-т.– Казань, 2002– 19 с.: 5 назв.– Деп. в ВИНТИ 18.10.02, № 3164 - В02.